

Identificarea sistemelor

Ingineria sistemelor, anul 3
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Lucian Buşoniu



Partea I

Introducere în identificarea sistemelor

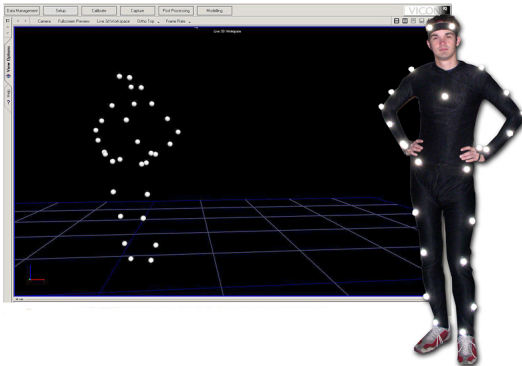
Obiectiv general

Identificarea unui sistem este procesul de creare a unui *model* care să descrie comportamentul unui *sistem dinamic*, din *date experimentale*.

Un exemplu informal

Un exemplu este captarea mișcărilor, în care:

- *Sistemul* este omul
- *Datele* sunt traiectoriile măsurate ale markerilor
- *Modelul* constă din reprezentări ale acestor traiectorii (de ex. curbe spline)



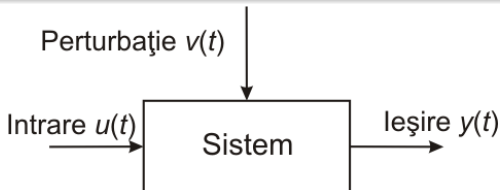
Conținut

- 1 Conceptul de sistem
- 2 Conceptul de model
- 3 Fluxul de lucru pentru identificare, cu exemplu
- 4 Organizarea disciplinei

Conceptul de sistem

Definiție informală

Un **sistem** este o parte a lumii cu o interfață bine definită, asupra căreia acționează semnale de *intrare* și de *perturbație*, și care produce semnale de *ieșire*.



Intrările pot fi controlate, dar nu și perturbațiile; adeseori perturbațiile nu pot fi nici măsurate. De notat că semnalele sunt funcții de timp, deci sistemul evoluează în timp – este *dinamic*.

Exemplu de sistem: O mașină (autovehicul)



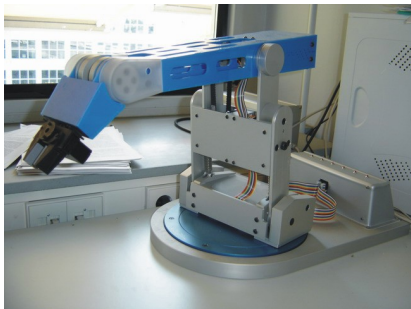
Considerăm mișcarea longitudinală (înainte) a unei mașini.

Intrări: Poziția pedalei de accelerație, treapta de viteză, poziția pedalei de frână.

Ieșire: Viteza.

Perturbație: Frecarea cu diferitele suprafețe de rulare.

Exemplu de sistem: Braț robotic



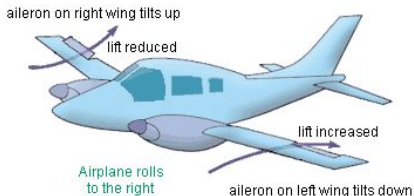
Considerăm un braț robotic care execută de ex. mișcări de tip “pick and place”.

Intrări: Voltaje pe motoarele de CC ale cuplelor și gripper-ului.

Ieșiri: Unghiurile elementelor și poziția gripper-ului.

Perturbații: Masa obiectului ridicat (sarcina), frecarea.

Exemplu de sistem: Avion



Considerăm mișcarea de rotație a unui avion în jurul axei longitudinale (en. *roll*).

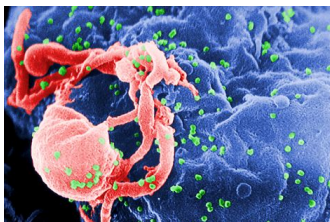
Intrare: Unghiul de deviație al eleronului.

Ieșire: Unghiul de rotație al avionului.

Perturbații: Vânt, deviațiile altor suprafețe de control, etc.

De notat că studiem doar o parte a dinamicii sistemului. Astfel de simplificări sunt adeseori efectuate.

Exemplu de sistem: Infecția cu HIV



Intrări: Cantități de medicament aplicate (de ex. PI, RTI).

Ieșiri: Numărul de celule-țintă infectate, respectiv sănătoase;
răspuns imunitar (toate per mililitru).

Perturbații: Co-infecții, caracteristicile fiecărui pacient.

Alte domenii

Ultimul exemplu ilustrează că modelarea și identificarea sistemelor sunt utile și în afara cazurilor tipice din automatică (sisteme electrice, mecanice, hidraulice, pneumatice cum ar fi cele descrise mai sus).

Alte domenii de aplicație sunt:

- Industria chimică.
- Infrastructura energetică, de transport, și de apă.
- Procesarea semnalelor.
- Economia.
- Științele sociale (de ex. dinamica rețelelor sociale).
- Etc.

Conținut

- 1 Conceptul de sistem
- 2 Conceptul de model**
- 3 Fluxul de lucru pentru identificare, cu exemplu
- 4 Organizarea disciplinei

Conceptul de model

Definiție informală

Un **model** este o descriere a sistemului care îi surprinde comportamentul relevant.

Caracteristică esențială: modelul este întotdeauna o *aproximare* (idealizare, abstractizare) a sistemului real.

Acest lucru este necesar (un model exact nu este fezabil) și dezirabil (modelele mai simple sunt mai ușor de înțeles și utilizat).

Clasificarea modelelor

- 1 Modele mentale sau verbale
- 2 Grafice și tabele
- 3 Modele matematice, cu două subtipuri:
 - Modele analitice, din principii de bază
 - Modele din identificarea sistemelor

Urmează exemple.

De notat că această clasificare este utilă, dar nu trebuie dusă prea departe. De ex. multe modele grafice sunt strâns legate de modele din identificarea sistemelor, și au bineînțeles o natură matematică.

Modele mentale / verbale: Exemplu

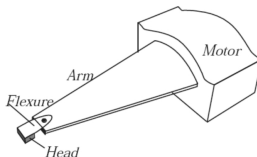


Modelul constă din reguli verbale de tipul:

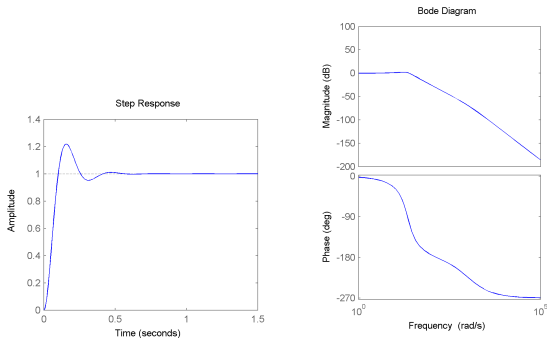
- Rotirea volanului duce la virarea mașinii.
- Apăsarea pedalei de accelerație crește viteza mașinii.
- Apăsarea pedalei de frână scade viteza mașinii.
- ...

Modele grafice: Exemplu


Considerăm un cap de citire-scriere pentru un hard disk, cu intrarea = voltajul motorului, și ieșirea = poziția capului



Modele grafice: Exemplu (continuare)



Modelul reprezintă comportamentul sistemului în formă grafică, de ex. *răspuns la treaptă* (indicial) sau *răspuns la frecvență* (diagrama Bode). Următoarele două cursuri vor trata astfel de modele (mai exact răspunsul la treaptă și la impuls).

 **Conexiune:** Teoria sistemelor (reamintim răspunsul la treaptă și impuls al sistemelor de ordinul 1 și 2, diagramele Bode).

Modele analitice din principii de bază

Se aplică legile fizice (de ex. echilibre de forțe) pentru a obține ecuații ce descriu sistemul. Modelele rezultante sunt de obicei ecuații diferențiale ce implică intrările și ieșirile.

Caracteristici:

- Rămân valide în toate punctele de funcționare.
- Oferă o înțelegere profundă a comportamentului sistemului.
- Nu sunt fezabile dacă sistemul este prea complicat sau insuficient înțeles.

 **Conexiune:** Modelarea proceselor.

Modele analitice: Exemplu



$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau$$

Intrări: Cuplurile motoarelor, concatenate în vectorul $\tau \in \mathbb{R}^n$. n este numărul de cuple.

Ieșiri: Unghiurile elementelor, concatenate în vectorul $\theta \in [-\pi, \pi)^n$.

τ și θ sunt funcții de timp (omitem aici argumentul t). Derivata în raport cu timpul este notată cu un punct, de ex. $\dot{\theta} = d\theta/dt$.

M : matricea de masă, C : matricea forțelor centrifuge și Coriolis, G : vectorul gravitației (nu intrăm în expresiile lor detaliate).

Modele matematice din identificarea sistemelor

Obținute numeric, din date experimentale colectate de la sistem.

Caracteristici (comparativ cu modelele analitice):

- Sunt valide de obicei doar *local*, în jurul unui punct de funcționare.
- Oferă mai puțină înțelegere asupra sistemului.
- Sunt ușor de construit și de folosit, și reprezintă singura opțiune în multe aplicații.

Focusul principal al acestui curs de identificarea sistemelor.

Un exemplu detaliat este dat în secțiunea următoare.

Identificarea de tip cutie neagră și cutie gri

Dacă nu există nici o informație a priori despre sistem, o structură generică va fi aleasă: model de tip **cutie neagră**.

Modelele complet analitice se numesc și de tip **cutie albă**.

Modelele de tip **cutie gri** se situează între modelele cutie-neagră și cele analitice: structura modelului se poate obține din principii de bază, dar anumiți parametri sunt necunoscuți și trebuie identificați din experimente.

Exemplu: ecuația brațului robotic $M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau$ este disponibilă, dar coeficienții de frecare ai cuplelor sunt necunoscuți.

Utilizarea modelelor

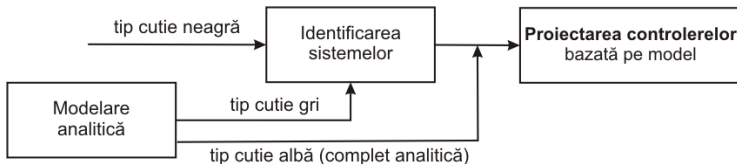
Modelele sunt utile în multe scopuri, dintre care:

- **Analiza** modelului (pentru a determina caracteristici cum ar fi stabilitatea, constantele de timp etc.)
- **Simularea** răspunsului sistemului în situații noi. Permite studierea unor scenarii care ar fi periculoase sau costisitoare pentru sistemul real (de ex. cum ar reacționa un pacient cu HIV la strategii noi de tratament).
- **Predicția** ieșirilor viitoare ale sistemului (de ex. predicția meteo).
- **Proiectarea unui controler** care să obțină un comportament bun al sistemului (de ex. răspuns rapid, suprareglaj mic).
- **Proiectarea sistemului în sine**, prin studierea comportamentului său înainte de a-l construi efectiv (cum sistemul nu este disponibil în acest caz, este nevoie de modelarea analitică din principii de bază.)

Proiectarea controlerelor este cea mai relevantă pentru noi, ca ingineri automatiști.

 **Conexiune:** Ingineria reglării automate (anul acesta)

Fluxul de lucru pentru proiectarea controlerelor



Sumar al conexiunilor cu alte discipline

Identificarea sistemelor **folosește cunoștințe de la:**

- Algebră liniară
- Calcul numeric
- Modelarea proceselor
- Teoria sistemelor
- Optimizări

și **este utilă pentru:**

- Ingineria reglării automate
- Sisteme de conducere a proceselor continue
- Sisteme de conducere a roboților
- etc.

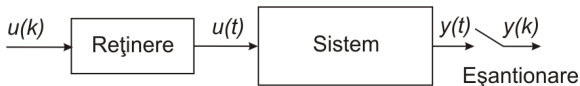
Conținut

- 1 Conceptul de sistem
- 2 Conceptul de model
- 3 Fluxul de lucru pentru identificare, cu exemplu**
- 4 Organizarea disciplinei

Flux de lucru - exemplu

Identificarea sistemelor se aplică de obicei în timp discret.

Schema tipică a unui sistem în timp discret:

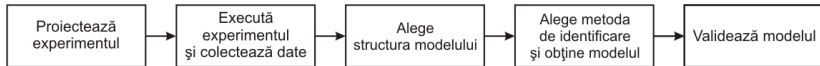


Vom considera aici un braț robotic flexibil, u = cuplu, y = accelerația brațului. Datele provin din DaiSy (Database for the Identification of Systems), <http://homes.esat.kuleuven.be/~smc/daisy/>.

Flux pasul 0: Stabilirea scopului modelului

Scop: **Simularea** răspunsului brațului flexibil.

Flux pasul 1: Proiectarea experimentului

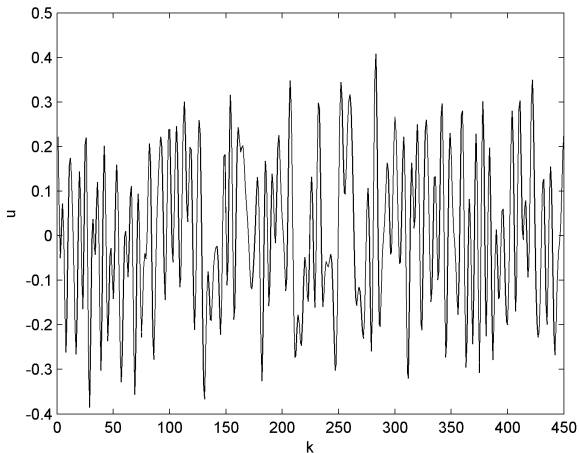


Un element esențial al proiectării experimentului este selecția semnalului de intrare (durată, perioadă de eșantionare, formă). Intrarea trebuie să fie suficient de informativă pentru a evidenția comportamentul relevant al sistemului.

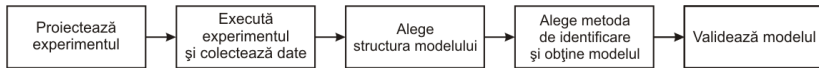
De obicei se impun constrângeri: sistemul nu poate fi plasat în regimuri periculoase, nu poate devia prea mult de la un punct de funcționare profitabil, etc.

Flux pasul 1: Proiectarea experimentului: exemplu

Semnal de intrare: $u(k)$, $k = 0, 1, 2, \dots, N$



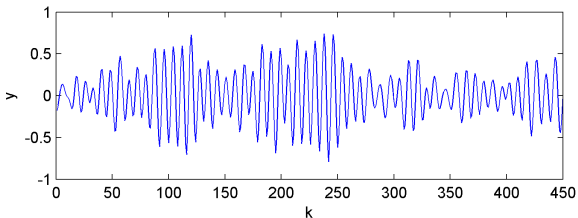
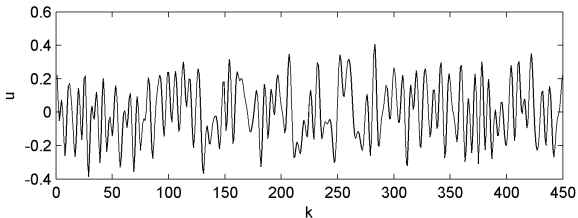
Flux pasul 2: Experiment



Se execută experimentul și se înregistrează datele de ieșire.

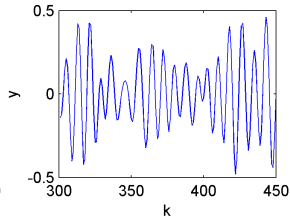
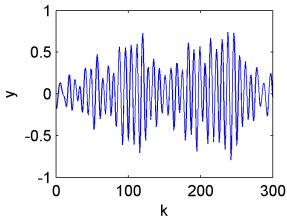
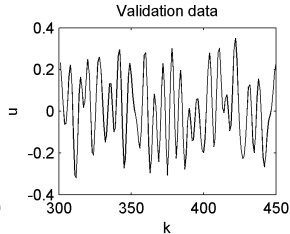
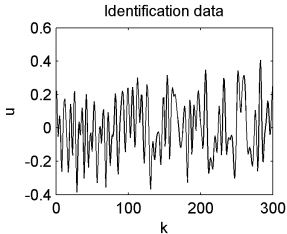
Flux pasul 2: Experiment: Exemplu

$$y(k), k = 0, 1, 2, \dots, N$$

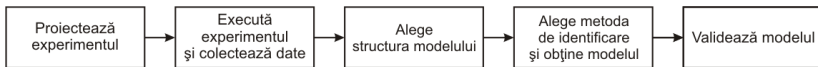


Flux pasul 2: Experiment: Exemplu (continuare)

Împărțim datele într-un set pentru *identificare* și altul pentru *validare* (important mai târziu).



Flux pasul 3: Structură model



Se alege structura modelului (grafic sau matematic, etc.)

Orice cunoștințe sau intuiții despre sistem trebuie exploatate în alegerea unei structuri potrivite: destul de flexibilă pentru a modela precis sistemul, dar suficient de simplă pentru ca identificarea să fie eficientă.

Flux pasul 3: Structură model: Exemplu

Alegem așa-numita structură “ARX”, unde ieșirea $y(k)$ la pasul discret curent este calculată pe baza intrărilor și ieșirilor precedente:

$$y(k) + a_1y(k-1) + a_2y(k-2) + a_3y(k-3) \\ = b_1u(k-1) + b_2u(k-2) + b_3u(k-3) + b_4u(k-4) + e(k)$$

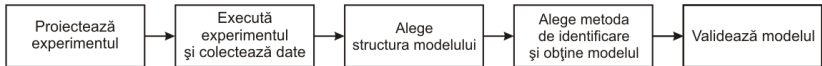
echivalentă cu

$$y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - a_3y(k-3) \\ + b_1u(k-1) + b_2u(k-2) + b_3u(k-3) + b_4u(k-4) + e(k)$$

$e(k)$ este eroarea indusă de către model la pasul k .

Parametrii modelului: a_1, a_2, a_3 și b_1, \dots, b_4 .
(Reamintim că y și u sunt *datele*.)

Flux pasul 4: Identificarea modelului



O metodă de identificare este aleasă și aplicată pentru identificarea parametrilor modelului. Metodele aplicabile depind de structura aleasă.

Flux pasul 4: Identificarea modelului: Exemplu

Identificarea modelului ales constă din găsirea parametrilor $a_1, a_2, a_3, b_1, \dots, b_4$. Alegem o metodă care minimizează suma erorilor pătratice $\sum_{k=1}^{300} e^2(k)$ pe datele de identificare. Algoritmul în sine va fi prezentat într-un curs ulterior.

Soluția este:

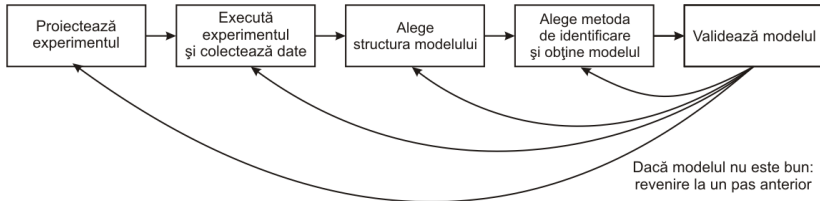
$$a_1 = -2.24, a_2 = 2.17, a_3 = -0.83,$$

$$b_1 = -0.24, b_2 = 0.45, b_3 = -0.41, b_4 = 0.22$$

ducând prin înlocuirea în structură la modelul aproximativ:

$$y(k) = 2.24y(k-1) - 2.17y(k-2) + 0.83y(k-3) \\ - 0.24u(k-1) + 0.45u(k-2) - 0.41u(k-3) + 0.22u(k-4)$$

Flux pasul 5: Validarea modelului

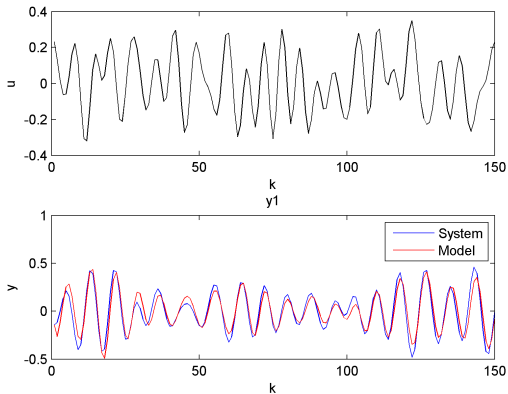


Validarea este un pas esențial: modelul trebuie să fie suficient de bun *pentru scopurile stabilite*. Dacă validarea eșuează, unii dintre (sau toți) pașii precedenți 1–4 trebuie refăcuți.

De ex., ieșirea modelului obținut poate fi comparată cu răspunsul real al sistemului, pe un set de date de validare. Acest set ar trebui să fie diferit de setul folosit pentru identificare (fie se execută un experiment separat, fie se împart datele experimentale în două seturi, unul de identificare și altul de validare).

Flux pasul 5: Validarea modelului: Exemplu

Folosim setul de validare pe care l-am rezervat la pasul 2:



Scopul de a simula răspunsul sistemului este atins (pentru intrări care sunt “bine reprezentate” de către intrarea experimentală aleasă).

Conținut

- 1 Conceptul de sistem
- 2 Conceptul de model
- 3 Fluxul de lucru pentru identificare, cu exemplu
- 4 Organizarea disciplinei**

Cunoștințe necesare și literatură

Cunoștințe necesare:

Sisteme și modele dinamice, algebră liniară, metode numerice, statistică, Matlab (subiectele matematice necesare vor fi recapitulate în cadrul cursului)

Literatură

- Obligatorie: prezentările de curs, scrise suficient de detaliat pentru a oferi o imagine completă și de sine stătătoare.

Cursanții pot consulta opțional și:

- T. Söderström, P. Stoica. *System Identification*. Prentice Hall, 1989, carte care formează baza cursului. Textul complet este disponibil gratuit și legal la: <http://user.it.uu.se/~ts/bookinfo.html>.
- Carte avansată: L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, 2nd ed., Prentice Hall, 1999.

Creditul pentru anumite idei se cuvine cursului de identificare de la Uppsala University, al lui K. Pelckmans.

<http://www.it.uu.se/edu/course/homepage/systemid/vt12>

Notare

Laboratoare: o soluție funcțională trebuie dezvoltată *în timpul laboratorului* pentru prezență. Cel mult 2 laboratoare se pot recupera la sfârșitul semestrului.

Notare

- $2 \times 20\% = 40\%$ – 2 teste de laborator: 1h, studenții vor aplica metode studiate (alese aleator).
- 30% – proiect.
- 30% – examen scris final.
- 10% – chestionare de curs: notate începând de la cursul 2.

Website, contact

http://busoniu.net/teaching/sysid2018/index_ro.html

Email responsabil: lucian@busoniu.net
sau asistent: marius.costandin@aut.utcluj.ro

Pe website se găsesc:

- Programul activităților disciplinei
- Prezentările de curs
- Materialul de laborator
- Informații despre proiect
- etc.